

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 川井 茂樹

本論文は、ダイナミックフォース顕微鏡 (Dynamic Force Microscopy, DFM) の高感度高分解能化を目的とした、高周波化を行った研究である。これまでに理論的側面より、高周波化を行うことは、力勾配センサーであるカンチレバーの熱雑音の影響を少なくでき、高感度高分解能化が期待できることは示されていた。また、カンチレバーの探針と試料表面間に発生する相互作用力は、ナノメートル以下の領域で強い非線形性があり、一般的に用いられていた10ナノメートル程度の振幅では検出効率が悪く、低振幅化の必要性が近年報告されている。本論文により、高周波化と低振幅化を同時に満たす高真空と超高真空下で動作するDFMを開発製作することに成功した。また、カンチレバーの撓み二次振動が低振幅撮像に必要な高いバネ定数を有することに着目し、オングストローム以下の超微小振幅でSi(111)-7×7表面を撮像することに成功した。更に、微小振幅撮像により検出感度が著しく高くなるため比較的遠距離のところでも原子分解能撮像ができることに着目し、これまでDFM観察が困難であった無秩序表面である急冷Si(111)-1×1表面中にある様々な相を安定して撮像できることを示した。そのなかで、探針と試料表面間の相互作用力を意図的に大きくすることにより、表面の原子構造が変化することを捉えた。一方、撓み振動ではなく、捩れ振動を用いたダイナミックラテラルフォース顕微鏡によりSi(111)7×7表面の原子分解能を取得することに成功した。これらの観察結果は、開発製作したDFMが既存の装置と比較して著しく観察性能を向上させることを示すものである。

本論文は六つの章から構成されている。第一章では本研究の背景、DFMの基礎的事項とこれまでの研究状況について概観し、その中から発生した問題と本研究の目的が述べられている。第二章では、DFMの動作原理と発生する相互作用力について詳細に述べ、なぜ低振幅撮像と高周波化がDFMの高感度高分解能化に必要なかをまとめている。第三章では、低振幅化と高周波化を実現するために開発した高真空下と超高真空下で動作するDFMについて述べられている。カンチレバーの振動計測に用いたヘテロダインドップラー干渉計、DFMの機械部品、また安定した自励振動を実現するために発振回路及びその周辺回路が述べられている。第四章では、本システムを用いた観察結果について述べられている。撓み二次振動を用いることにより実現した低振幅撮像によるSi(111)-7×7表面の原子分解能取得を報告している。また、この観察手法により検出感度が

向上している為、比較的試料表面から離れたところでも原子分解能を取得することに着目し、これまで DFM 観察にとって困難とされていた無秩序表面である急冷 Si(111)- 1×1 表面上にある $c(2\times 8)$ や $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造の原子分解能観察に付いて報告してある。その中で、急冷中に再構成できなかったシリコンのクラスターの原子分解能像について報告している。これまで走査型トンネル顕微鏡では、電荷移動のためクラスター中の全ての原子を観察することは出来なかったが、本観察により初めて全ての原子を観察することに成功したことになり、DFM 観察の利点を示す典型的な観察結果である。更に、意図的に相互作用力を大きくすることにより、機械的な相互作用力によりおこなった原子構造の再構成を報告してある。一方、撓み振動ではなく擦れ振動を用いることにより、ダイナミックラテラルフォース顕微鏡を報告してある。高真空下で、グラファイト原子ステップと 2 層目以下に存在する欠陥に付いて観察した結果を報告してある。また、超高真空下で始めて取得した原子分解能像を報告してある。この原子分解能像は、安定したものではなかったが、単原子間に発生する摩擦力やラテラルフォースを検出できる可能性を示すには十分な観察結果であった。第五章では、各章での結論に付いてのべ、第六章では本研究により明らかになったことの更に発展できる内容に付いて提案されている。

以上のように、論文提出者は、DFM の高感度高分解能化を詳細に研究し、装置を開発し、それを用いて優位性を証明し、これからの DFM の発展する方向性の重要な知見を示した。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。